

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-014895

(43)Date of publication of application : 15.01.2003

(51)Int.Cl.

G21K 1/06

G01N 23/00

G21K 5/02

G21K 5/08

(21)Application number : 2001-202762

(71)Applicant : RIGAKU CORP

(22)Date of filing : 03.07.2001

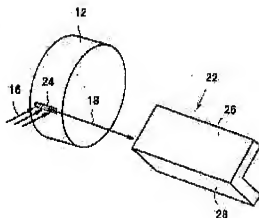
(72)Inventor : HAYASHI SEIICHI
HARADA JINPEI
TAKAHASHI SADAYUKI
KURIBAYASHI MASARU

(54) X-RAY ANALYZER AND X-RAY SUPPLIER

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To maximize X-ray intensity focusing on a sample by combining a rotary anode X-ray tube and a specific complex monochromator and finding an optimum condition in the case.

SOLUTION: For an X-ray analyzer reflecting an X-ray beam 18 emitted from an X-ray source with a monochromator 22 and irradiating a sample, the X-ray source is made the rotary anode X-ray tube 10. The monochromator 22 is a complex monochromator contacting each side of a first elliptic monochromator 26 and a second elliptic monochromator 28. X-ray focal point 24 is arranged on the target 12 of the X-ray tube on one focus position of the elliptic monochromators. The minimum distance from the focal point 24 of the X-ray to the complex monochromator 22 is set at 40 to 100 mm. When the distance is set as such, if effective focal pint size on the target of the X-ray tube is made 40 to 100 μ m, the X-ray intensity on the sample becomes maximum.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

21.08.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the
examiner's decision of rejection or application
converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3762665

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2003-14895
(P2003-14895A)

(43) 公開日 平成15年1月15日 (2003.1.15)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	データベース (参考)
G 2 1 K 1/06		G 2 1 K 1/06	G 2 G 0 1 B M
G 0 1 N 23/00		G 0 1 N 23/00	
G 2 1 K 5/02		G 2 1 K 5/02	X

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 11 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2001-202762(P2001-202762)

(22) 出願日 平成13年7月3日 (2001.7.3)

(71) 出願人 000250339

理学電機株式会社
東京都昭島市松原町3丁目9番12号

(72) 発明者 林 精一

東京都昭島市松原町3丁目9番12号 理学
電機株式会社内

(72) 発明者 原田 仁平

東京都昭島市松原町3丁目9番12号 理学
電機株式会社内

(74) 代理人 100091421

弁理士 鈴木 利之

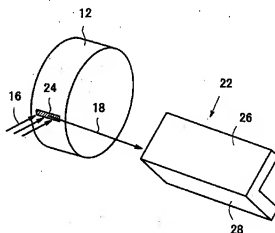
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 X線分析装置およびX線供給装置

(57) 【要約】

【課題】 回転対陰極X線管と所定の複合モノクロメータとを組み合わせて、その場合の最適条件を見出すことで、試料に集束するX線強度を最大にする。

【解決手段】 X線源から出射するX線ビーム18をモノクロメータ22で反射してから試料に照射するX線分析装置において、X線源を回転対陰極X線管10とする。モノクロメータ22は、第1の楕円モノクロメータ26と第2の楕円モノクロメータ28の圓縁同士を互いに接合した複合モノクロメータであり、各楕円モノクロメータの一方の焦点の位置にX線管のターゲット12上のX線焦点24を配置する。このX線焦点24から複合モノクロメータ22までの最短距離を40～100mmに設定する。このような距離に設定したときに、X線管のターゲット12上の実効的な焦点サイズを40～100μmにすれば、試料上のX線強度が最大になる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 X線源から出射するX線ビームをモノクロメータで反射してから試料に照射するX線分析装置において、次の特徴を備えるX線分析装置。

(ア) 前記X線源は回転対称極X線管であり、そのターゲット上の実効的な焦点サイズは $40 \sim 100 \mu\text{m}$ である。

(イ) 前記モノクロメータは、第1の楕円モノクロメータと第2の楕円モノクロメータの側縁同士を互いに接合した複合モノクロメータであり、各楕円モノクロメータの一方の焦点の位置に前記ターゲット上のX線焦点が配置されている。

(ウ) 前記第1の楕円モノクロメータと前記第2の楕円モノクロメータは人工多層膜で形成されていて、この人工多層膜は、回折に寄与する多層膜界面が反射面に平行になっていて、かつ、特定の波長のX線に対して反射面の任意の位置でブラッグの回折条件を満足するように楕円弧に沿って前記人工多層膜の周期が連続的に変化している。

(エ) 前記ターゲット上のX線焦点から前記複合モノクロメータまでの最短距離は $40 \sim 100 \text{mm}$ である。

【請求項 2】 X線源から出射するX線ビームをモノクロメータで反射してからX線ビームを出射するX線供給装置において、次の特徴を備えるX線供給装置。

(ア) 前記X線源は回転対称極X線管であり、そのターゲット上の実効的な焦点サイズは $40 \sim 100 \mu\text{m}$ である。

(イ) 前記モノクロメータは、第1の楕円モノクロメータと第2の楕円モノクロメータの側縁同士を互いに接合した複合モノクロメータであり、各楕円モノクロメータの一方の焦点の位置に前記ターゲット上のX線焦点が配置されている。

(ウ) 前記第1の楕円モノクロメータと前記第2の楕円モノクロメータは人工多層膜で形成されていて、この人工多層膜は、回折に寄与する多層膜界面が反射面に平行になっていて、かつ、特定の波長のX線に対して反射面の任意の位置でブラッグの回折条件を満足するように楕円弧に沿って前記人工多層膜の周期が連続的に変化している。

(エ) 前記ターゲット上のX線焦点から前記複合モノクロメータまでの最短距離は $40 \sim 100 \text{mm}$ である。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 この発明は、試料の入射側のモノクロメータとして2個の楕円モノクロメータを組み合わせた複合モノクロメータを利用しているX線分析装置およびX線供給装置に関する。

【0002】

【従来の技術】 特開平11-326599号公報に開示されているX線分析装置は、試料の入射側のモノクロメ

ータとして、2個の楕円モノクロメータを組み合わせた複合モノクロメータを利用している。この複合モノクロメータは、2個の楕円モノクロメータの側縁同士を互いに接合したものである。各楕円モノクロメータの反射面は人工多層膜で作られていて、その周期（結晶の格子面間隔に相当）が楕円弧に沿って連続的に変化している。また、X線源としては実効的な焦点サイズが $30 \mu\text{m}$ 以下のマイクロフォーカスX線源を用いている。

【0003】 上述した従来のX線分析装置は、焦点サイズが $30 \mu\text{m}$ 以下のマイクロフォーカスX線源を使うことで、X線源とモノクロメータをかなり近づけても（好ましくは 30mm 以下に近づけても）、X線源の焦点サイズに起因する入射角の広がりが、楕円モノクロメータによる回折ピークの半値幅の範囲内に収まるようになり、楕円モノクロメータに到達したX線を無駄なく活用できるようになった。また、X線源とモノクロメータをかなり近づけることができるので、楕円モノクロメータに入射するX線の捕捉角を大きくできて、試料に集束するX線強度を飛躍的に高めることができた。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】 上述した従来のX線分析装置は、X線源とモノクロメータとの距離を好ましくは 30mm 以下に近づけているので、X線源としては固定式のターゲットを用いている。マイクロフォーカスで、かつ、固定式のターゲットの場合、X線管に投入できるパワーには限界があり、投入パワーを大きくすることで試料に集束するX線強度をさらに高めることは困難であった。

【0005】 この発明は上述の問題点を解決するためになされたものであり、その目的は、回転対称極X線管と上述の複合モノクロメータとを組み合わせて、その場合の最適条件を見出すことで、試料に集束するX線強度をさらに高めることができるようにしたX線分析装置およびX線供給装置を提供することにある。

【0006】

【課題を解決するための手段】 この発明は、X線源から出射するX線ビームをモノクロメータで反射してから試料に照射するX線分析装置において、次の（ア）～

（エ）の特徴を備えるものである。（ア）前記X線源は回転対称極X線管であり、そのターゲット上の実効的な焦点サイズは $40 \sim 100 \mu\text{m}$ である。（イ）前記モノクロメータは、第1の楕円モノクロメータと第2の楕円モノクロメータの側縁同士を互いに接合した複合モノクロメータであり、各楕円モノクロメータの一方の焦点の位置に前記ターゲット上のX線焦点が配置されている。

（ウ）前記第1の楕円モノクロメータと前記第2の楕円モノクロメータは人工多層膜で形成されていて、この人工多層膜は、回折に寄与する多層膜界面が反射面に平行になっていて、かつ、特定の波長のX線に対して反射面の任意の位置でブラッグの回折条件を満足するように楕

円弧に沿って前記人工多層膜の周期が連続的に変化している。(エ)前記ターゲット上のX線焦点から前記複合モノクロメータまでの最短距離は40〜100mmである。

【0007】また、この発明は、試料にX線を照射するX線分析装置だけでなく、それ以外の用途のX線供給装置としても使うことができる。すなわち、請求項2の発明はこのようなX線供給装置の発明であり、X線源から射出するX線ビームをモノクロメータで反射してからX線ビームを射出するX線供給装置において、上述の

(ア)〜(エ)の特徴を備えるものである。このX線供給装置は、例えば、(1)X線分析を目的とするX線分析装置のためのX線供給装置として、(2)X線照射による加工・治療等を目的とするX線照射装置のためのX線供給装置として、(3)X線描画を目的とするX線描画装置のためのX線供給装置として、使うことができる。このX線供給装置は、複合モノクロメータの第1焦点に置かれているX線源から射出するX線ビームを複合モノクロメータで集光し、反射してから、このX線ビームを複合モノクロメータの第2焦点に向けて大きな出力で再射出することができる。

【0008】

【発明の実施の形態】図1は、この発明のX線分析装置の一実施形態を概略的に示した平面図であり、図2は、その回転対称性と複合モノクロメータとの位置関係を示した斜視図である。図1において、回転対称軸X線管10は、回転するターゲット12を備えている。電子銃14から射出された電子ビーム16がターゲット12の外周面に当たると、その照射領域(X線の焦点)からX線ビーム18が発生する。このX線ビーム18をベリリウム窓20から取り出して、複合モノクロメータ22に入射する。X線ビーム18の取り出し角度はターゲット表面に対して約6度である。X線ビーム18は複合モノクロメータ22で単色化されると共に集束化されて、試料上の微小な照射スポットに照射される。ターゲット12上の焦点の中心から複合モノクロメータ22までの最短距離はL1であり、複合モノクロメータの長さはL2である。

【0009】図2において、円筒状のターゲット12の外周面には細長い焦点24が形成される。この焦点24の長手方向はターゲット12の回転軸に平行である。複合モノクロメータ22は、第1の楕円モノクロメータ26と第2の楕円モノクロメータ28からなり、これらの楕円モノクロメータ26、28の側縁同士が直角になるように接合されている。各楕円モノクロメータの反射面は人工多層膜で作られていて、回折に寄与する多層膜界面が反射面に平行になっており、その周期(結晶の格子面間隔に相当)は楕円弧に沿って連続的に変化している。このような複合モノクロメータの形状やその作用については、特開平11-326599号公報に詳しく開

示されているので、ここではその詳しい説明は省略する。

【0010】図3は複合モノクロメータの作用を説明する斜視図である。第1の楕円モノクロメータ26及び第2の楕円モノクロメータ28の第1焦点F1の位置にターゲット上のX線焦点を配置し、第1の楕円モノクロメータ26及び第2の楕円モノクロメータ28の第2焦点F2の位置に、試料上のX線照射領域を配置する。第1焦点F1の位置で発生したX線ビームは、最初に第1の楕円モノクロメータ26で反射し、次に、第2の楕円モノクロメータ28で反射して、第2焦点F2の位置にある試料に照射される。あるいは、最初に第2の楕円モノクロメータ28で反射した場合には、次に、第1の楕円モノクロメータ26で反射して、試料に照射される。第1の楕円モノクロメータ26と第2の楕円モノクロメータはその形状は基本的に同じである。したがって、以下の記載では第1の楕円モノクロメータ26について説明している。

【0011】図4は第1の楕円モノクロメータ26でX線を集束する原理を示す説明図である。第1の楕円モノクロメータ26の反射面は楕円弧面からなり、この楕円弧面は、楕円30の一部分である楕円弧を紙面に垂直な方向に平行移動したときにできる軌跡である。楕円30の第1焦点F1から第1の楕円モノクロメータ26を見込む角度 α は、楕円モノクロメータ26がX線ビームを捕捉する角度を示すものであり、捕捉角 α と呼ぶことにする。捕捉角 α が大きいほどX線の利用効率が高い。一方、楕円30の第2焦点F2から第1の楕円モノクロメータ26を見込む角度 β は、試料に入射するX線の入射角度のパラツキを示すものであり、集束角 β と呼ぶことにする。一般に、試料をX線分析するときに集束角 β は小さい方が好ましい。

【0012】次に、ターゲット上のX線焦点の実効的な焦点サイズについて説明する。実効的な焦点サイズとは、X線の取り出し方向から見たときのターゲット上の焦点のサイズである。この場合、差し渡し寸法が一番大きいところを焦点サイズとする。例えば、ターゲット上に1mm×0.1mmの細長い焦点を形成した場合に、ここから取り出し角度6度でライン焦点で取り出すと(図2を参照)、実効的な焦点サイズはほぼ0.1mm×0.1mmとなる。この場合、実効的な焦点サイズは0.1mmである。

【0013】回転対称軸と上述の複合モノクロメータとを組み合わせる場合に、各種の条件を検討していくと、ターゲット上の焦点サイズについて最適値が存在することが分かった。すなわち、最適な焦点サイズを選択したときに、試料上のX線強度(試料に当たるX線の合計強度)が最も大きくなることを見出した。そこで、そのような最適条件を見つける手順とその最適結果とを以下に詳しく説明する。まず、次の(1)〜(5)の事項を考

慮した。

(1) ターゲットの焦点サイズと最大投入パワーとの関係

【0014】回転対陰極における焦点サイズ t と、そのときの可能な最大投入パワー W との関係は良く知られており、その関係は図9のグラフようになる。このグラフは、図14の(1)式から求めたものである。(1)式は回転対陰極の最大投入パワー W (許容負荷)を求める式であり、ターゲットの熱負荷能力を考慮して作られたものである。ターゲットの材質として銅を選択し、回転数を6000rpmとし、ターゲットの直径を10cm、ターゲットの厚さ(表面から冷却面までの厚さ)を0.2cmとすると、最大投入パワー W はターゲット上の焦点の幅 t (実効的な焦点サイズに相当する)に依存する。なお、焦点の長さ F は焦点の幅 t の10倍であると仮定している。図9のグラフから分かるように、焦点サイズが大きくなれば最大投入パワーが増加する。

(2) 人工多層膜の製造上の制約から決まる条件

【0015】楕円モノクロメータ(人工多層膜ミラー)については、製造技術上の制約から、モノクロメータの長さ L 2(図1を参照)を80mmとしている。また、反射面を構成する人工多層膜の周期 d (結晶の格子面間隔に相当)については、その最大値 d_{max} を5.0nm、最小値 d_{min} を2.5nmとしている。楕円モノクロメータでは、多層膜の周期 d は楕円弧に沿って連続的に変化するが、この周期 d の値が2.5～5.0nmの範囲内に収まっていれば、この多層膜を作ることができる。ところで、反射面でX線が回折するためには、図16の(8)式のブラッグの条件式を満足する必要がある。 d は人工多層膜の周期であり、 λ はX線の波長であり、 θ は反射面に入射するX線の入射角である。回転対陰極のターゲットの材質として銅を用いる場合、CuK α 線の波長 λ は0.154nmである。人工多層膜の周期の最大値 d_{max} と最小値 d_{min} について、これをブラッグの条件式を用いて入射角 θ に換算すると、それぞれ、図16の(9)式と(10)式のようになる。

【0016】(3) 反射面の許容受光角に関する条件
楕円モノクロメータの反射面は図6に示すような反射特性を示す。この反射率曲線は有限の角度幅 ω (半値角)を持ち、X線の入射角がその角度幅 ω 内に入れば、この反射面でX線が反射されることになる。この角度幅 ω を許容受光角(アクセプタクル角)と呼ぶ。入射するX線の角度幅(入射角の広がり)が許容受光角 ω よりも小さければ、入射するX線はすべて反射するが、許容受光角 ω よりも大きければ、入射するX線の一部は反射しないことになる。X線源から発生したX線を楕円モノクロメータで最も効率良く取り込むためには、入射するX線の角度幅(入射角の広がり)が許容受光角 ω に等しくなるように楕円モノクロメータをX線源に近づければよい。図5において、X線源の実効的な焦点サイズを t 、

X線源からモノクロメータの反射位置までの距離を L 3、モノクロメータの許容受光角を ω とすると、 $L3 = t / \omega$ 、(ω の単位はラジアン)の関係が成立するとき、入射するX線の角度幅が許容受光角 ω に等しくなる。したがって、このような関係式を満足するように、 $L3$ と t の関係を定めるのが最も効率的である。例えば、 $\omega = 0.05$ 度の場合、実効的な焦点サイズ t が0.1mmのときに、 $L3$ は約114mmになる。モノクロメータの中央においてX線源からの距離が114mmであるならば、モノクロメータの前端(X線源に一番近い端部)ではX線源からの距離は74mmになる(モノクロメータの長さは80mmなので114mmから40mmを引くと74mmになる)。

【0017】(4) 楕円の形状と入射角 θ との関係

図4において、XY座標軸を図示のように設定すると、楕円30の曲線式は図15の(3)式のようになる。この(3)式を微分すると(4)式になり、これが楕円30の各点での傾き(楕円の接線の傾き)になる。これを角度に直すと、楕円30の各点での傾きは(5)式のようになる。一方、焦点F1から楕円30上の各点を見上げたときの仰角(X軸に対する角度)は図15の(6)式のようになる。ここで、(6)式中の f は、図4に示すように、焦点F1と座標軸の原点との距離である。楕円30上の各点におけるX線の入射角 θ は、(6)式の仰角から(5)式の傾きを引いたものであり、(7)式のようになる。図7は、(5)式の「傾き」と(6)式の「仰角」と(7)式の「入射角 θ 」とをグラフにしたものである。横軸は、厳密には、楕円上の各点における「座標軸原点からの距離」とすべきものであるが、実際の楕円はきわめて偏平しているので座標軸原点と焦点F1はきわめて接近しており、横軸を「焦点F1からの距離」としても実質的には同じである。したがって、横軸は「焦点からの距離」と表示している。縦軸は角度(単位は度)である。このグラフにおいて、人工多層膜の周期の制約から定まる θ_{max} と θ_{min} も表示している。 θ_{max} は図16の(9)式で求めたものであり、 θ_{min} は(10)式で求めたものである。特定の長さ a と短径 b を有する楕円について、楕円の各点における入射角 θ を求めた場合、この入射角 θ が、図7に示すように、楕円モノクロメータの全長 $L2$ にわたって(この場合、焦点からの距離が100～180mmにおいて)、 θ_{max} と θ_{min} の間にあれば、人工多層膜の制約条件を満足することになる。図7のグラフは、楕円の長さ a を280nm、短径 b を5mmとして計算したときのものである。図8のグラフは、図7のグラフにつき、焦点からの距離が100～180mmの部分を変換して示したものであり、さらに、短径 b の値を変更したときの入射角変化を示している。すなわち、短径 b を5.0mm、4.5mm、4.2mmと変化させると、入射角 θ の曲線は、図8のように変化する。この場合、いずれの b の値でも、入射

角 θ は θ_{\max} と θ_{\min} の間に収まっている。

【0018】(5) 試料上の照射スポットのサイズとモノクロメータの配置位置との関係

図4において、第2焦点F2には試料を配置することになるが、試料上のX線照射スポットのサイズは0.3mm以下にするのが好ましい。また、集束角 β は0.2度以下にするのが好ましい。第1焦点F1からモノクロメータ26の中心までの距離をL4、第2焦点F2からモノクロメータ26の中心までの距離をL5とすると、試料上のX線照射スポットのサイズは、「X線源の実効的な焦点サイズ t 」 $\times (L5/L4)$ に等しい。例えば、 $t=0.1$ mmのときに、L5をL4の3倍にすれば、試料上のX線照射スポットのサイズは0.3mmになる。楕円30を固定して、楕円30上で楕円モノクロメータ26をX線源に近づければ試料上の照射スポットのサイズは大きくなり、X線源より遠ざければ照射スポットのサイズは小さくなる。

【0019】次に、最適な焦点サイズを求める具体的な手順の一例を説明する。最適な焦点サイズとは、試料上のX線強度が最大となるような焦点サイズである。図17は焦点サイズごとの最大の捕捉角 α を求める手順を示したフローチャートである。このフローチャートは、距離L1と焦点サイズ t の二つの組み合わせについて、最大の捕捉角 α が得られるような楕円形状(長径 a と短径 b)を決定する(同時に、その最大の捕捉角 α がいくらかであるかを決定する)ための手順を示したものである。

【0020】まず、図1の距離L1(すなわち、X線焦点から複合モノクロメータ22の前端までの距離)を決定する。この発明は試料上でのX線強度を大きくするのが目的であるから、基本的には、複合モノクロメータ22をできるだけX線源に近づけて、X線の捕捉角 α を大きくすることが大切である。したがって、距離L1は100mm以下とする。一方で、回転対称X線管において、ターゲット上の焦点からベリリウム窓20までの距離を小さくするには限界があり、当然ながら、ターゲット上の焦点から複合モノクロメータ22の前端までの距離L1もそれほど小さくできない。通常、距離L1の最小値は60mm程度が限界であり、X線管の構造を工夫しても、せいぜい、距離L1の最小値は40mm程度である。したがって、距離L1は40~100mmの範囲で、最適な焦点サイズを求めることとする。ところで、上述の「反射面の許容受光角に関する条件」において検討したように、 $\omega=0.05$ 度の場合、実効的な焦点サイズ t が0.1mmのときに、距離L1を約74mmにすると、X線を楕円モノクロメータで最も効率良く取り込むことができる。よって、距離L1を40~100mmの範囲に設定することは、焦点サイズにもよるが、許容受光角の観点から考えて妥当な値になっている。

【0021】実際の計算では、距離L1について100mm、80mm、60mm、40mmの4種類について

計算している。以下の説明ではL1=80mmの場合を例にして説明する。そこで、図17のフローチャートにおいて、距離L1を80mmに設定して、次の「焦点サイズ t の決定」に移る。焦点サイズ t は、0.01mmから0.4mmまでの20種類の値(図18の一覧表の t の列を参照)を選択した。そのそれぞれについて、最大の捕捉角 α を求めた。よって、最初に、焦点サイズ t を0.01mmに設定する。これで、L1=80mmと $t=0.01$ mmの組み合わせが決まる。

【0022】次に、「楕円の長径 a を決定」に移る。楕円の長径 a を決めるには、試料上の照射スポットサイズを考慮する。図4において、上述したように、試料上のX線照射スポットのサイズは0.3mm以下にするのが好ましい。実効的な焦点サイズ t が0.01mmのときに、照射スポットサイズを0.3mm以下にするには、 $L4:L5=1:3.0$ 以下の関係にすればよい。したがって、 $L4=(L1+40\text{mm})=120\text{mm}$ なので、 $L5=360\text{mm}$ 以下となる。楕円の長径 a はL4+L5に実質的に等しいので、 $a=3720\text{mm}$ 以下にすればよい。実施例の計算では、 $a=1860\text{mm}$ に設定している(図18の一覧表を参照)。

【0023】次に、「楕円の短径 $b=0.1$ 」に移る。以下の手順では、楕円の短径 b を0.1から10まで、0.1きざみで変化させて、そのそれぞれについて、捕捉角 α を計算し、短径 b がいつのときに、最大の捕捉角が得られるか、そしてその捕捉角はいくらであるかを求めている。そこで、最初に $b=0.1$ と設定する。これで長径 a と短径 b が決まったので、図7のグラフの入射角 θ の曲線を計算できる。焦点点からの距離が80~160mmの範囲内(モノクロメータの範囲内)において、この入射角 θ の曲線が θ_{\max} と θ_{\min} の間に収まっていれば、入射角条件は合格となる。また、楕円モノクロメータの位置と楕円の形状が決まっているので、図4の捕捉角 α と集束角 β も計算できる。集束角が0.2度以内になっていなければ、集束角条件も合格である。入射角条件と集束角条件が両方とも合格していれば、そのときの捕捉角 α を短径 b の値と共に記憶する。以上が「入射角と集束角が合格した場合に捕捉角 α を記憶」のステップである。入射角条件と集束角条件のいずれかが不合格であれば、その b の値は使えないので、捕捉角 α は記憶しない。

【0024】次に、「 $b=1.0$ 」の判定に移る。 b が1.0に達していなければ、「 $b=b+0.1$ 」を実行してから、「入射角と集束角が合格した場合に捕捉角 α を記憶」のステップを繰り返す。そして、 $b=1.0$ に達したら、「捕捉角 α の最大値を取得」に移り、これまでに記憶した捕捉角 α の中の最大値とそのときの b の値を取得する。以上のような計算が完了すると、図18に示す表の $t=0.01$ の行のデータが完成する。この表において、 t 、 a 、 b 、 $L4$ の単位はmmであり、 α の2乗

の単位はステラジアンである。 $t=0.01$ の条件を例にとると、長径 a が1860mm、短径 b が10mmのときに捕捉角 α が最大になり、その最大となった捕捉角 α を2乗した値(単位はステラジアン)は1.18869×10のマイナス4乗となる。表中で「E-4」は「10のマイナス4乗」を意味する。複合モノクロメータを使うと、図3に示すように、X線は二つの楕円モノクロメータで順に反射してから試料上に集束するから、捕捉角 α を2乗したものが試料上のX線強度に比例することになる。したがって、捕捉角 α の2乗を表中に記載している。表中のL4は図4に示すL4であり、これはL1+40mmである。 $t=0.15$ mm以上の条件のときにL4の値が120mmを超えているのは、L1=80mmの条件のままでは、その他の条件(入射角条件や集束角条件)を満足しないために、L1を動かしているためである。

【0025】図18の表の捕捉角 α の2乗をグラフに示したものが図11の上段のグラフの「捕捉角(s t r)」の曲線である。縦軸に捕捉角 α の2乗の値を、横軸に焦点サイズ t の値をとっている。また、図11の上段のグラフの「投入パワー(W)」の曲線は図9の曲線をそのまま載せたものである。図11の下段のグラフは、上段のグラフの捕捉角の曲線と投入パワーの曲線とを掛け算した値をプロットしたものである。捕捉角(α を2乗したもの)と投入パワーの積は、試料上のX線照射強度に比例すると考えられるので、これを「効率」と呼ぶことにする。この効率の値は、焦点サイズ t に依存して変化しており、最適値が存在する(曲線の山が存在する)ことが分かる。このグラフによれば、L1=80mmのときには、焦点サイズを60 μ mにすると効率最大になることが分かる。最大効率から25%低下するところまでを実用的な使用範囲と考えると、焦点サイズが約40~90 μ mの範囲内のときに最も効率が高いことになる。

【0026】同様にして、L1=100mm、60mm、40mmの条件についても同様のグラフを作ることができて、それぞれのグラフを図10、図12、図13に示す。図10では、L1=100mmの条件において、焦点サイズを70 μ mにすると効率最大になり、実用的な最大効率の範囲は約60~100 μ mである。図12では、L1=60mmの条件において、焦点サイズを50 μ mにすると効率最大になり、実用的な最大効率の範囲は約40~80 μ mである。図13では、L1=40mmの条件において、焦点サイズを40 μ mにすると効率最大になり、実用的な最大効率の範囲は約30~70 μ mである。

【0027】なお、焦点サイズが30 μ mというのは、L1=40mm(回転対称X線管でこれを実現するのはかなり難しい)のときに効率が優れているものであり、L1=60~100mmのときには、それほど優

た効率にはならない。したがって、L1=40~100mmの全体で考えると、焦点サイズが40~100 μ mのときに、おおむね優れた効率が得られる、と言うことができる。

【0028】

【発明の効果】この発明のX線分析装置は、回転対称X線管と上述の複合モノクロメータとを組み合わせる場合に、ターゲット上の実効的な焦点サイズを40~100 μ mにして、ターゲット上のX線焦点から複合モノクロメータまでの最短距離を40~100mmに設定することで、最も効率良く、試料に集束するX線強度を高めることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明のX線分析装置の一実施形態を概略的に示した平面図である。

【図2】図1における回転対称X線管と複合モノクロメータとの位置関係を示した斜視図である。

【図3】複合モノクロメータの作用を説明する斜視図である。

【図4】楕円モノクロメータでX線を集束する原理を示す説明図である。

【図5】楕円モノクロメータの反射面の許容受光角を説明する説明図である。

【図6】楕円モノクロメータの反射面の反射率曲線を示すグラフである。

【図7】楕円上の各点における入射角 θ の変化を示すグラフである。

【図8】図7のグラフの拡大図である。

【図9】焦点サイズと最大投入パワーとの関係を示すグラフである。

【図10】L1=100mmのときの効率を示すグラフである。

【図11】L1=80mmのときの効率を示すグラフである。

【図12】L1=60mmのときの効率を示すグラフである。

【図13】L1=40mmのときの効率を示すグラフである。

【図14】回転対称X線管の最大投入パワーを求める式である。

【図15】楕円曲線の式、楕円上の各点の傾きの式、焦点F1からの仰角の式、及び、入射角を求める式である。

【図16】ブラッグの条件式と、人工多層膜の最大周期と最小周期を入射角に換算した式である。

【図17】焦点サイズごとの最大の捕捉角 α を求める手順を示したフローチャートである。

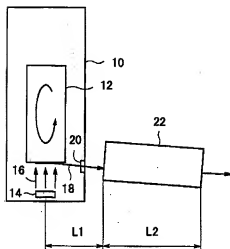
【図18】L1=80mmのときの計算結果を示す表である。

【符号の説明】

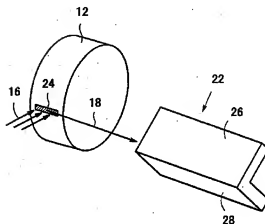
- 10 回転対陰極X線管
 12 ターゲット
 14 電子銃
 16 電子ビーム
 18 X線ビーム

- * 20 ベリリウム窓
 22 複合モノクロメータ
 24 焦点
 26 第1の楕円モノクロメータ
 * 28 第2の楕円モノクロメータ

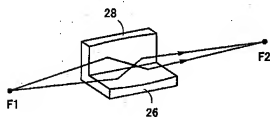
【図1】



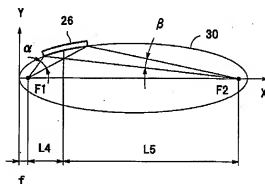
【図2】



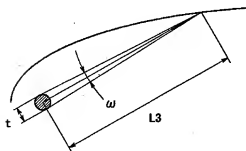
【図3】



【図4】



【図5】



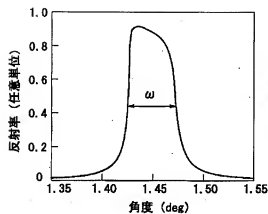
【図16】

$$2d \sin \theta = \lambda \quad \dots (8)$$

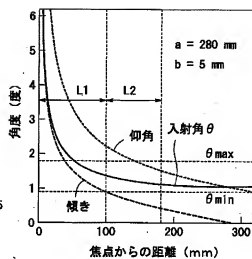
$$\theta_{\max} = \arcsin \left[\frac{\lambda}{2d_{\max}} \right] \frac{180}{\pi} \quad \dots (9)$$

$$\theta_{\min} = \arcsin \left[\frac{\lambda}{2d_{\min}} \right] \frac{180}{\pi} \quad \dots (10)$$

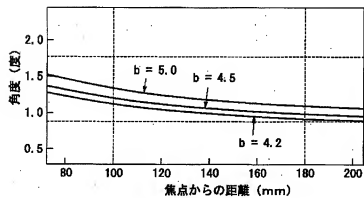
【図6】



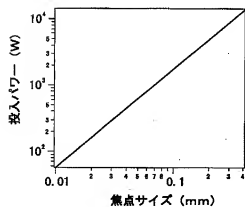
【図7】



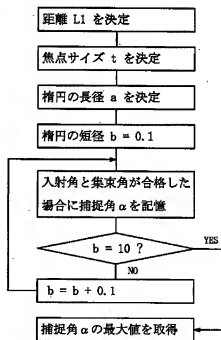
【図8】



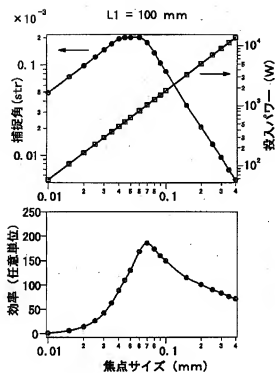
【図9】



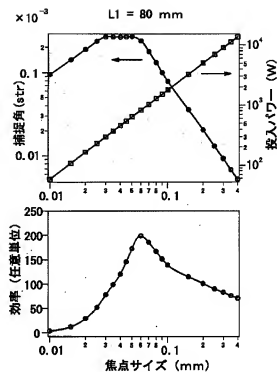
【図17】



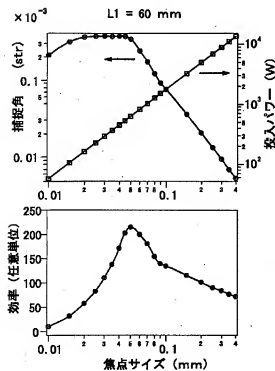
【図10】



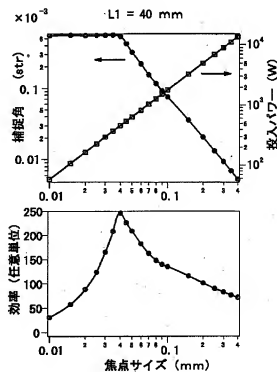
【図11】



【図12】



【図13】



【図 14】

$$W = \frac{4.2 S (T_m - T_o)}{\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D N C \rho \sigma}} + \frac{e}{C} \frac{t}{\pi D}} \quad \dots(1)$$

$$S = FL * t = 10t * t \quad \dots(2)$$

W : 最大投入パワー(W)

FL : 焦点の長さ(cm) = 10t

t : 焦点の幅(cm) = 焦点サイズ

Tm : ターゲット材質の融点(℃) = 1084

To : 冷却面温度(℃) = 100

C : ターゲット材料の熱伝導率(cal/cm. sec. °C)
= 0.76

ρ : ターゲット材料の密度(g/cm³) = 8.94

σ : ターゲット材料の比熱(cal/g. °C) = 0.12

N : 回転数 (rpm) = 6000

D : ターゲットの直径 (cm) = 10

e : ターゲットの厚さ (cm) = 0.2

【図 15】

$$y = b \sqrt{1 - \frac{(x-a)^2}{a^2}} \quad \dots(3)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-b(x-a)}{a^2 \sqrt{1 - \frac{(x-a)^2}{a^2}}} \quad \dots(4)$$

$$\text{傾き(度)} = \arctan \left[\frac{-b(x-a)}{a^2 \sqrt{1 - \frac{(x-a)^2}{a^2}}} \right] \frac{180}{\pi} \quad \dots(5)$$

$$\text{仰角(度)} = \arctan \left[\frac{y}{(x-f)} \right] \frac{180}{\pi} \quad \dots(6)$$

$$\text{入射角 } \theta = \text{仰角} - \text{傾き} \quad \dots(7)$$

【図 18】

L1 = 80 mm

t	a	b	L4	α ²
0.01	1060	10	120	1.16869 E-4
0.015	1260	10	120	1.78106 E-4
0.02	960	10	120	2.37218 E-4
0.025	780	10	120	2.98212 E-4
0.03	660	8.7	120	3.34131 E-4
0.035	574.286	8	120	3.35316 E-4
0.04	510	8.4	120	3.32664 E-4
0.045	460	8	120	3.37268 E-4
0.05	420	7.8	120	3.40705 E-4
0.06	360	6.5	120	2.86719 E-4
0.07	317.143	5.2	120	2.22762 E-4
0.08	285	4.2	120	1.66072 E-4
0.09	260	3.5	120	1.29422 E-4
0.1	240	3	120	1.00519 E-4
0.15	257.851	3.6	171.687	4.76262 E-5
0.2	286.479	4.1	229.163	2.63356 E-5
0.25	316.127	4.6	286.479	1.70901 E-5
0.3	343.776	5.1	343.776	1.20821 E-5
0.36	372.423	5.6	401.07	8.81764 E-6
0.4	401.07	5.9	468.366	6.78280 E-6

フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷

G 2 1 K 5/08

識別記号

F I

G 2 1 K 5/08

キーワード (参考)

X

(72) 発明者 高橋 貞幸

東京都昭島市松原町 3 丁目 9 番 12 号 理学
電機株式会社内

(72) 発明者 栗林 勝

東京都昭島市松原町 3 丁目 9 番 12 号 理学
電機株式会社内

F ターム (参考) 2G001 AA01 CA01 EA02 EA20